

Amélioration de la prévision de grêle avec AROME

Encadrement : Benoît Vié, Clotilde Augros, François Bouttier

Résumé

La grêle constitue un aléa atmosphérique majeur en Europe, responsable de coûteux dommages économiques. Sa formation, au sein de nuages convectifs profonds, dépend fortement des processus microphysiques gouvernant les hydrométéores en phase mixte, encore imparfaitement représentés dans les modèles de prévision. Le modèle météorologique à échelle convective AROME utilise en opérationnel le schéma microphysique ICE3, où la grêle n'est pas prévue explicitement. Un autre schéma microphysique plus avancé, LIMA, améliore certains aspects de la convection mais présente des biais dans la partie froide des nuages.

Cette thèse vise à améliorer la prévision de la grêle avec AROME en renforçant la représentation pronostique du graupel et de la grêle dans LIMA, via l'ajout de variables décrivant la densité et la fraction d'eau liquide des hydrométéores solides. Les nouvelles configurations seront évaluées sur des cas bien documentés puis sur un large échantillon de situations convectives, en s'appuyant sur des observations par radars polarimétriques, des observations au sol (ESWD) et des diagnostics radar de taille de grêle (MESH). L'objectif final est d'améliorer la représentation de la grêle dans AROME, au bénéfice de la prévision opérationnelle de l'occurrence et de la taille de la grêle au sol, et à termes, des études de risque de grêle en climat futur.

Contexte

La grêle constitue l'un des risques atmosphériques les plus coûteux en Europe, avec des pertes assurées atteignant plusieurs milliards d'euros lors des années actives. En France, les sinistres annuels s'élèvent à plusieurs centaines de millions d'euros, dépassant le milliard lors d'années catastrophiques. Ce phénomène affecte les cultures agricoles, endommage les bâtiments et véhicules, et peut blesser les personnes exposées. Les grêlons, hydrométéores très denses et pouvant atteindre plus de 10 cm de diamètre, se forment dans les systèmes convectifs intenses, tels que des supercellules. Les ascendances fortes y favorisent la présence de forts contenus en eau liquide surfondue en altitude, indispensables à la formation de grêle par givrage / croissance humide.

Les modèles de prévision numérique du temps régionaux à haute résolution, tels qu'AROME à Météo-France (Seity et al, 2011 ; Brousseau et al., 2016), sont de plus en plus performants pour la prévision des orages. Ces progrès sont liés à la prise en compte d'observations de plus en plus nombreuses pour leur initialisation (via l'assimilation de données), aux progrès de leur résolution (horizontale et verticale), mais aussi de leurs paramétrisations physiques (microphysique, turbulence, rayonnement...).

La version opérationnelle d'AROME utilise actuellement le schéma microphysique à un moment ICE3 (Pinty et Jabouille, 1998), qui représente l'évolution des contenus massiques en gouttelettes nuageuses, pluie, petits cristaux, neige et graupel. Une extension de ce schéma (ICE4) ajoute la représentation pronostique de la grêle mais n'est pas utilisée en

opérationnel. À la place, un diagnostic d'occurrence de grêle, moins coûteux, est calculé en aval de la prévision, à partir du contenu en graupel intégré sur la verticale.

Le schéma microphysique LIMA (Vié et al., 2016), est partiellement à deux moments dans sa version v1.0, et prévoit, en plus du contenu massique, la concentration en nombre des hydrométéores liquides (eau nuageuse et pluie) et des cristaux de glace. La neige et le graupel sont à un moment, et la grêle à un moment est disponible en option. Cette version v1.0 est actuellement en cours d'évaluation (sans l'option grêle) pour remplacer ICE3 dans AROME. David et al. (2025) ont étudié l'apport de LIMA pour la prévision de la convection avec AROME, sur 34 journées convectives de 2022 en métropole, en comparaison aux observations des radars polarimétriques de Météo-France. Ils ont montré une nette amélioration de la représentation de la pluie et des signatures polarimétriques (colonnes de Zdr en particulier) par rapport à ICE3, mais ont mis en évidence des biais dans la partie froide, tels qu'une sous-estimation des contenus en petits cristaux et en neige ainsi qu'un manque d'eau liquide surfondue.

Parallèlement à cette étude, deux mécanismes de production secondaire de glace ont été ajoutés à LIMA, la fragmentation des flocons lors des chocs avec le graupel et l'éclatement des gouttes de pluie lors de leur congélation. Ces nouveaux processus peuvent renforcer considérablement la formation de cristaux. La représentation de la neige a aussi été améliorée par Wurtz et al. (2023) à l'aide des observations de la campagne HAIC, aboutissant à une meilleure représentation des enclumes (extension et contenus) des systèmes convectifs tropicaux. Enfin, les travaux de July-Wormit et al. (2025) améliorent significativement la prévision d'eau liquide surfondue et de pluie verglaçante avec LIMA, en modifiant notamment la prise en compte de la croissance du graupel.

En parallèle de ces travaux, une nouvelle version de LIMA (v2.0) à deux moments pour tous les hydrométéores (y compris la grêle) a été développée par Taufour et al., (2024). Cette approche, uniquement évaluée sur un cas de supercellule idéalisée, a un impact important sur la répartition des hydrométéores en altitude et au sol, et pourrait être pertinente pour une meilleure estimation des cumuls de précipitations et du diamètre des grêlons au sol. En effet, la prévision du contenu en nombre en plus du contenu massique permet d'obtenir une estimation plus précise du diamètre moyen et maximal des grêlons.

D'autres approches intéressantes ont été implémentées et évaluées dans d'autres schémas microphysiques, telles que la prévision de la densité des particules givrées afin de mieux représenter la transition entre espèces graupel et grêle (Morrison et Milbrandt, 2015, Jensen et al. 2023) ou encore la prévision de la fraction en eau liquide des espèces fondantes ou en phase mixte (Cholette et al, 2023). Ces évolutions sont cruciales pour mieux simuler les observables radar, qui sont très utiles pour la validation des paramétrisations.

Pour évaluer ces nouvelles approches dans la représentation des processus microphysiques, de nouveaux jeux de données d'observation de la grêle sont disponibles à Météo-France. Les données de la base ESWD (Dotzek et al, 2009) permettent d'obtenir des observations ponctuelles de taille maximale des grêlons observés. D'autre part, un produit composite de réflectivité radar 3D haute résolution ($1 \times 1 \text{ km}^2$ sur l'horizontale, 500 m sur la verticale) couvrant la France métropolitaine, est produit toutes les 5 min et archivé depuis 2022 (SESAR IRMA, Scovell et Al-Sakka, 2016). Ce produit permet de dériver des diagnostics liés à la sévérité des orages, et en particulier le diagnostic MESH (Maximum Estimated Size of Hail, Witt et al, 1998). Un diagnostic avancé d'occurrence et de taille de grêle élaboré par apprentissage automatique à partir d'observations radar (Forcadell et al., 2024) pourra aussi être utilisé pour l'évaluation.

Par ailleurs, l'ensemble des radars couvrant la métropole est équipé de la double-polarisation, ce qui leur permet d'accéder à des variables directement liées aux propriétés physiques des hydrométéores, très utiles pour évaluer les schémas microphysiques. Pour pouvoir comparer directement ces observations au modèle, un opérateur d'observation radar polarimétrique (Augros et al, 2016) est disponible pour AROME et a été utilisé et amélioré par David et al (2025). Les outils mis en œuvre dans cette étude, permettant de d'intercomparer les distributions tridimensionnelles des variables radar polarimétriques simulées avec AROME et observées au sein des cellules convectives, serviront aussi pour l'évaluation.

Objectifs

L'objectif de la thèse est donc d'évaluer et améliorer la prévision de la grêle avec le modèle AROME, en améliorant la représentation pronostique du graupel et de la grêle avec le schéma microphysique LIMA. Pour cela, on ajoutera une variable pronostique pour prévoir la densité (ou la fraction massique issue de givrage) aux hydrométéores glacés, ce qui permettra de mieux représenter les transitions entre espèces (neige, graupel, grêle) et leurs propriétés (relation masse diamètre, vitesse de chute). Dans un deuxième temps, on testera également l'effet de l'ajout d'une variable pronostique de fraction en eau liquide, afin de mieux représenter les transitions entre espèces liquides et solides et les processus de croissance par givrage et fonte. Ces nouvelles représentations seront comparées aux différentes options actuellement disponibles avec LIMA, y compris la version v2.0 entièrement à deux moments avec l'option grêle explicite.

Méthode

Des simulations AROME seront dans un premier temps réalisées sur un petit nombre de cas d'étude pour lesquels des observations abondantes seront disponibles (radar, observations in-situ). L'utilisation d'outils spécifiques, comme les diagnostics DDH (<https://github.com/UMR-CNRM/ddhtoolbox/>) qui donnent accès aux tendances individuelles de chaque processus physique, permettra de bien comprendre les interactions complexes entre espèces et processus selon les configurations évaluées.

Une évaluation plus robuste sera ensuite conduite sur un grand nombre de situations et/ou sur une période longue (par exemple deux mois contenant de nombreux jours convectifs). Elle permettra notamment de quantifier l'impact des changements proposés sur la qualité générale de la prévision AROME.

L'évaluation objective de LIMA s'appuiera sur la comparaison à de nombreuses observations. En premier lieu, la comparaison aux observations radar polarimétriques, via l'opérateur d'observation operadar (<https://github.com/UMR-CNRM/operadar>), s'appuiera sur les outils développés par David et al. (2025) permettant de suivre comparer les profils verticaux des variables radar polarimétriques simulées et observées au sein des cellules convectives. Pour évaluer la pertinence de la prévision de grêle au sol (étendue spatiale des zones couvertes et diamètre des grêlons), on utilisera les rapports de l'ESWD, ainsi que le diagnostic MESH.

Résultats attendus

Les progrès attendus en termes de prévision opérationnelle sont multiples. Une meilleure représentation de la taille et de la densité des grêlons permettra d'améliorer les prévisions d'intensité de la convection et du risque de grêle, d'allonger les délais d'anticipation, offrant ainsi un temps de réaction accru pour la protection des personnes et des biens. Au-delà de

l'amélioration de la prévision opérationnelle de la grêle, cette thèse s'inscrit dans une perspective plus large de compréhension et d'anticipation du risque grêle dans un climat changeant. Une représentation physique plus réaliste de la grêle dans AROME constitue en effet un prérequis essentiel pour alimenter les futures simulations climatiques régionales à haute résolution afin d'explorer l'évolution du risque de grêle, un enjeu majeur pour l'adaptation des secteurs agricole, assurantiel et de la gestion des risques naturels.

- Augros, C., Caumont, O., Ducrocq, V., Gaussiat, N., & Tabary, P. (2016). Comparisons between S, C, and X band polarimetric radar observations and convective-scale simulations of HyMeX first special observing period. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142, Issue S1, 347–362. <https://doi.org/10.1002/qj.2572>
- Brousseau, P., Seity, Y., Ricard, D., & Léger, J. (2016). Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* <https://doi.org/10.1002/qj.2822>
- Cholette, M., Milbrandt, J. A., Morrison, H., Paquin-Ricard, D., & Jacques, D. (2023). Combining Triple-Moment Ice With Prognostic Liquid Fraction in the P3 Microphysics Scheme: Impacts on a Simulated Squall Line. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 15(4), e2022MS003328. <https://doi.org/10.1029/2022MS003328>
- David, C., Augros, C., Vié, B., Bouttier, F., & Le Bastard, T. (2025). Improved simulation of thunderstorm characteristics and polarimetric signatures with LIMA two-moment microphysics in AROME. *Atmospheric Measurement Techniques*, 18(15), 3715–3745. <https://doi.org/10.5194/amt-18-3715-2025>
- Dotzek, N., Groenemeijer, P., Feuerstein, B., & Holzer, A. M. (2009). Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research, 4th European Conference on Severe Storms*, 93(1), 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.020>
- Forcadell, V., Augros, C., Caumont, O., Dedieu, K., Ouradou, M., David, C., Figueras i Ventura, J., Laurantin, O., & Al-Sakka, H. (2024). Severe-hail detection with C-band dual-polarisation radars using convolutional neural networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(22), 6707–6734. <https://doi.org/10.5194/amt-17-6707-2024>
- Jensen, A. A., Thompson, G., Ikeda, K., & Tessendorf, S. A. (2023). Improving the Representation of Hail in the Thompson Microphysics Scheme. *Monthly Weather Review*, 151(9), 2307–2332. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0319.1>
- July-Wormit, M., Vié, B., & Lac, C. (2026). Improving supercooled liquid water representation in LIMA using ICICLE data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 152(774), e70030. <https://doi.org/10.1002/qj.70030>
- Morrison, H., & Milbrandt, J. A. (2015). Parameterization of Cloud Microphysics Based on the Prediction of Bulk Ice Particle Properties. Part I: Scheme Description and Idealized Tests. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(1), 287–311. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0065.1>
- Pinty, J.-P., & Jabouille, P. (1998). A mixed-phased cloud parameterization for use in a mesoscale non-hydrostatic model: Simulations of a squall line and of orographic precipitation. *Proc. Conf. on Cloud Physics, Everett, WA, Amer. Meteor. Soc.* http://mesonh.aero.obs-mip.fr/mesonh/dir_publication/pinty_jabouille_ams_ccp1998.pdf
- Scovell, R., & al-Sakka, H. (2016). A Point Cloud Method for Retrieval of High-Resolution 3D Gridded Reflectivity from Weather Radar Networks for Air Traffic Management. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(3), 461–479. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0051.1>

- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., & Masson, V. (2011). The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139(3), 976–991. <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2010MWR3425.1>
- Taufour, M., Pinty, J.-P., Barthe, C., Vié, B., & Wang, C. (2024). LIMA (v2.0): A full two-moment cloud microphysical scheme for the mesoscale non-hydrostatic model Meso-NH v5-6. *Geoscientific Model Development*, 17(23), 8773–8798. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-8773-2024>
- Vié, B., Pinty, J.-P., Berthet, S., & Leriche, M. (2016). LIMA (v1.0): A quasi two-moment microphysical scheme driven by a multimodal population of cloud condensation and ice freezing nuclei. *Geosci. Model Dev.*, 9(2), 567–586. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-567-2016>
- Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchell, E. D. W., & Thomas, K. W. (1998). An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013%25253C0286:AEHDAF%25253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013%25253C0286:AEHDAF%25253E2.0.CO;2)
- Wurtz, J., Bouniol, D., & Vié, B. (2023). Improvements to the parametrization of snow in AROME in the context of ice crystal icing. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(752), 878–893. <https://doi.org/10.1002/qj.4437>